

LENNOKKIKUVAUKSEN KUVAPEITON VAATIMUKSET

Maallmasta Oy

Sirviö Teemu

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2018

Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Teemu Sirviö	Vuosi	2018
Ohjaaja	Pasi Laurila		
Toimeksiantaja	Maallmasta Oy		
Työn nimi	Lennokkikuvauksen kuvapeiton vaatimukset		
Sivu- ja liitesivumäärä	35 + 8		

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka kuvapeitot vaikuttavat fotogrammetristen laskentojen laatuun käyttäen Agisoftin Photoscan -ohjelmaa ja päästäänkö niillä JHS-185-suositukset täyttäviin tuloksiin. Aineisto kerättiin yhteistyössä Maallmasta Oy:n kanssa AeroTekniikka-M017 -lennokilla. Laatua tarkasteltiin tukipisteiden RMSE-arvoja tarkkailemalla ja vertailemalla pistepilviä referenssiaineistoihin. Lähtökohtana oli tutkia työtä kustannustehokkuuden ja pistepilvien tarkkuuden osalta.

Työ tehtiin kvantitatiivisen menetelmän avulla. Työhön kuuluu perusteita selventävä teoriaosuus ja pohdinta. Ensimmäiseksi tehtiin kirjallisuuskatsaus aiheeseen. Toisessa osassa suoritettiin aineiston keruu ja tutkimus. Kuvia otettiin 180 metriä leveältä ja 600 m pitkältä alueelta, josta tutkittiin pistepilven tarkkuutta alueen läpi kulkeneen tien pinnan osalta. Kymmenkunta harjoituslaskentaa tehtiin, ennen kuin saatiin aikaan verrattavissa olevia ja luotettavia pistepilviä.

Tutkimuksessa selvisi, että JHS-185-suosituksen luokan yksi täyttäviin tuloksiin päästiin 52 % pituuspeitolla ja 80 % sivupeitolla. Pituuspeittoa ei voitu tutkia lennon asetuksissa sattuneen virheen takia. Kameran ollessa tarpeeksi laadukas voidaan pitää lentokorkeus korkealla ja näin säästää lentoaikaa ja silti päästä hyviin GSD-lukemiin sekä kuvapeittoihin. Säällä ja auringon korkeuskulmalla on merkitystä geometrisen prosessoinnin laatuun, kuten tässä työssä osoitettiin. Kuvauksia voisi ajoittaa mahdollisuuksien mukaan keskipäivään tasaisen auringon paisteen tai ohuen tasaisen pilvipeitteen aikaan.

Technology, Communication and
transport
Degree Programme in Land Surveying
Bachelor of Engineering

Author	Teemu Sirviö	Year	2018
Supervisor	Pasi Laurila		
Commissioned by	Maallmasta Oy		
Subject of thesis	Requirements for the UAV Image Overlapping		
Number of pages	35 + 8		

The objective of this Bachelor's thesis was to analyze the impact of image overlapping on the accuracy of photogrammetric calculations by using Agisoft's Photoscan program. The aim was to find out the cost efficiency and the lowest needed overlap between the photos to fulfill a JUHTA's JHS-185 guides accuracy. This thesis was commissioned by Maallmasta Oy and the aerial photography was gathered in cooperation with their "fixed-wing" type UAV.

A qualitative research method was chosen for the thesis. The quality of point clouds was analyzed by Ground Control Points RMSE values. The point clouds were compared with a reference surface that was generated by triangulating the most accurate data. This thesis is divided into two main parts. The first part gives an overview of the literature research. The second part consists of gathering the data, calculating the point clouds and analyzing the results. The point cloud comparison was made with an open source program CloudCompare.

The forwardlap between the photos was not possible to include in the research due the mistake in the flight settings. The objective of this work was reached with the image overlap about 52 % along track and 80 % across track. The results showed that the quality of the camera, a reasonably spread GDP, a well-planned flying route, an adequate image overlap and a weather are the most significant factors affecting the accuracy of the point cloud.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	YLEISTÄ FOTOGRAMMETRIASTA.....	7
2.1	Fotogrammetrian historia	7
2.2	Fotogrammetrinen mittaus ilmasta.....	7
3	UAV-KUVAUS	11
3.1	Kehitys ja nimikkeistö.....	11
3.2	Maanmittausalan käyttöön saatavat tuotokset	11
3.3	UAV:n muu ammatti- ja harrastekäyttö	13
3.4	Trafin ja EU:n säädökset.....	14
3.5	Valmiin aineiston vaatimukset.....	16
4	AINEISTON ESITTELY JA KÄSITTELY	17
4.1	Tutkittavan aineiston mittausten organisointi	17
4.2	Testipaikan kuvaus	18
4.3	Referenssiverkko	19
4.4	Mittauslennot	21
4.5	Kuvien valinta pilvien muodostamiselle.....	22
4.6	Pistepilvien generointi	23
4.7	Aineistojen vertailu	26
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	29
5.1	Tulokset	29
5.2	Kustannustehokkuus ja aineiston laatu	31
6	POHDINTA	33
	LÄHTEET	35

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

DTM	Digital terrain model, digitaalinen maastomalli
ERTS-GKn	Gauss-Krüger-projektio Suomelle, keskimeridiaani n astetta Itään
FPV	(First Person View) tarkoittaa videokuvan avulla tapahtuvaa lennätystä
GCP	Ground Control Point
GSD	Ground sample distance. Ilmaisee pikselikoon maastossa
JHS	Julkisen hallinnon suositukset
KMTK	Kansallinen maastotietokanta
N2000	Suomalainen korkeusjärjestelmä, epookki 2000.0
RTK	Real-time kinematic positioning, tosiaikainen kinemaattinen paikannus
RMS(E)	Root mean square (error). Neliöllinen keskiarvo. Käytetään ilmaisemaan aineiston tarkkuutta verrattuna referenssiaineistoon

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää lennökkikuvauksen vaadittavat kuvapeitot, joilla päästään JHS-185-suositukset täyttäviin tuloksiin. Työn tilaajana toimi Maallmasta Oy, jonka lennökkikalustolla mittaukset tehtiin lokakuussa 2017. Alue, jolla tutkimuksen mittaukset tehtiin, oli kooltaan noin kooltaan 180 m leveä ja 600 m pitkä tieosuus Kiimingin ja Yli-lin välisellä Kiimingintien varrella.

Pienten miehittämättömien ilma-aluksien käyttö maanmittauksen sovelluksissa on lisääntynyt viimeisten vuosien aikana ja muuttanut maanmittausalankin vanhoja tapoja työskennellä. Miehittämättömiä ilma-aluksia käytetään nykyisellään jo todella laajasti eri aloilla harrastus- ja ammattikäytössä; kuvaamiseen, mittamiseen, pelastustehtäviin, kartoitukseen, tarkkailuun ja seurantaan, ihmisten ja pakettien kuljetukseen sekä koko kehityksen taustalla olevaan sotateollisuuden tarpeisiin. Tekniikan rantauduttua sotilaskäyttöön suunnittelusta siviilipuolelle on avannut valtavat mahdollisuudet käytön kehittymiselle. Nykyinen akkutekniikka ja mittalaitteiden, kuten laserkeilainten kehitys on myös osaltaan edesauttanut uusia maanmittauksen sovelluksia kehittymään.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään fotogrammetrian ja lennökkikuvauksen historiaa, Trafin antamaa ilmailumääräystä, käydään läpi kuvausprosessi, jälkikäsitteilyt ja vertailut. Tarkkuuden vertailu suoritettiin vertaamalla kuvista prosessoitua pistepilveä takymetrillä mitattuihin referenssipisteisiin ja tarkimmasta pistepilvestä laskettuun kolmiomalliin.

Työssä käytetyn ”fixed wing” -tyyppisen AeroTekniikka-M017 -lennokin siipiväli on vajaa kaksi metriä ja se on hyvin vakaa liikkeissään. Näin ollen työssä käytettyjä yksityiskohtia lukiessa täytyy kiinnittää huomiota, voiko niitä suoraan verrata epävakaampiin, esimerkiksi neliroottoriin UAV:iin.

2 YLEISTÄ FOTOGRAMMETRIASTA

2.1 Fotogrammetrian historia

Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen historia voidaan jakaa kuvien kartoitus-käytön perusteella neljään peräkkäiseen aikakauteen: mittapöytäfotogrammetri-aan, analogiseen, analyyttiseen ja digitaaliseen. Historiassa ensimmäinen askel oli valokuvauksen keksiminen vuonna 1839. Vaiheet voidaan jakaa noin 50 vuo-den pituisiksi ajanjaksoiksi. Ensimmäisessä jaksossa topografit tekivät havaintoja maakuvista karttoja tehdessään. Ensimmäiset ilmakuvaukset tehtiin kuumailma-pallosta vuonna 1855. Kuvat olivat viistokuvia. Kuvien käsittely oli maaston kar-toitusta ajatellen hankalaa ja esimerkiksi kuvanottopaikan ja kuvaussuunnan määrittäminen lähes mahdotonta. Analogisen fotogrammetrian tärkein sovellus oli ilmakuvauk- sen oikaistut ilmakuvakartat. Ensimmäisen maailmansodan päätyt- tyä alettiin tekemään järjestelmällisiä kartoitusilmakuvauksia lentokoneista. Tämä edesauttoi sarjakuvaukseen soveltuvien ilmakuvakameroiden kehitystä 1920-lu- vulla. Analyyttisen fotogrammetrian jaksossa sovellukset ohjelmoitiin tietoko- neelle ja pistetihennyksen avulla saatiin jo tuotettua tarkkoja maastomalleja. Di- gitaalisen fotogrammetrian jakso alkoi 1960-luvulla ja kehittyi tänäkin päivänä. Kuvissa siirryttiin digitaaliseen muotoon ja kehitettiin uusia kuvaustekniikoita. Ny- kyaikaiset mittausskojeet ja menetelmät ovat tuoneet paljon nopeutta ja tark- kuutta. Nykyään ilmakuvakartoista on tultu dynaamisiin 3D-malleihin. (Haggren 2011, 1; Haggren 2002, 9.)

2.2 Fotogrammetrinen mittaus ilmasta

Fotogrammetria hankkii ympäristömme kohteiden kolmiulotteisia mittauksia ja malleja valokuvien avulla. Perinteisen fotogrammetrian perustehtävänä on mää- rittää 3D-sijainti ja orientaatio jollekin kohteelle. Fotogrammetria perustuu kuva- havaintoihin ja piirteiden eli liitospisteiden mittauksiin. Ne ovat pisteitä, jotka voi- daan löytää usealta kuvalta. Tietoa mitataan esimerkiksi lentokoneissa tai UAV:ssa olevilla kameroilla. Yleisesti lentokoneesta suoritettavassa ilmakuvauk-

sessä kuvapeiton (Kuvio 1) täytyy olla vähintään 60 % lentosuunnassa (pituuspeitto) ja 30 % vierekkäisiltä linjoilta (sivupeitto). (Laurila 2012, 2; Rantanen 2017, 13; Teittinen 2017, 16–19.)

Usein UAV-kuvauksella mitattava materiaali on huomattavasti tarkempaa kuin esimerkiksi karttasovelluksissa saatavissa olevat ortokuvat. Esimerkiksi Maanmittauslaitoksen tuottamissa ortokuvissa maastoresoluutio (GSD, Ground Sampling Distance) on 50 cm tai 25 cm alueesta riippuen (MML 2010). Mikäli tahdotaan parantaa tuotettavien aineistojen laatua erotuskyvyn osalta, täytyy kuvapeittoja kasvattaa. UAV-kuvauksessa käytetään huomattavasti suurempia kuvapeittoja, pituuspeitto jopa 90 % ja sivupeitto jopa 70 %. (Kuvio 1). Kuvapeittojen kasvattaminen auttaa huomattavasti myös automaattisen ilmakolmioinnin prosessia. Kasvattamalla kuvapeittoja voidaan myös kompensoida tuulelle herkün UAV:n kuvauksessa mahdollisesti syntyviä epätarkkuuksia. (Colomina & Molina 2014, 83, 90–91.)

Kansallisen maastotietokannan selvityksessä todetaan voitavan teitä ja jokia kuvata kolmella lentolinjalla niiden muotoa mukaillen. Näissä kuvauksissa täytyisi olla 80 % pituuspeitolla ja 60% sivupeitolla, jotta ongelmia lopputuotteiden korkeuden deformaatioissa ja itsekalibroinnissa pystytään välttämään (Kansallinen maastotietokanta 2018.)

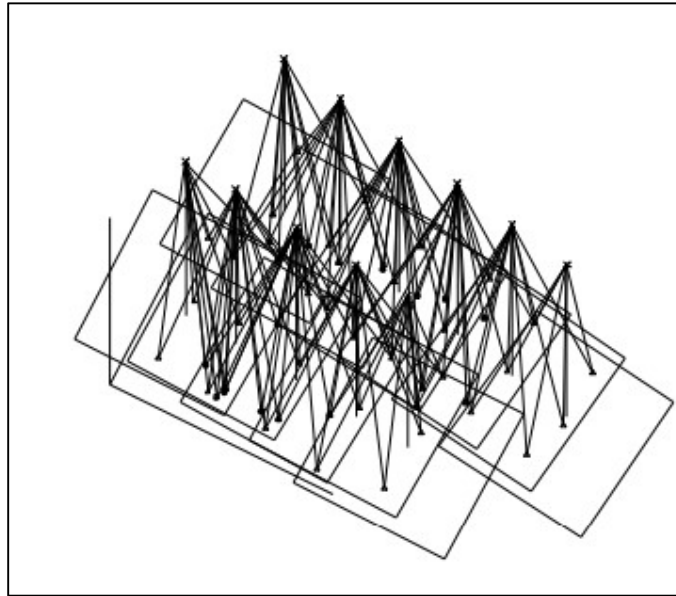
Useimmiten lennökkikuvaukset lennetään samalla periaatteella kuin lentokoneesta suoritettavat kartoitukset. Mitattava alue ja lentoreitti suunnitellaan ennakoon. UAV:tä "autopilot"-tilassa ohjaavaan sovellukseen annetaan mitattavan alueen kulmapisteet ja ohjelma ehdottaa sopivaa tai tehokkainta lentoreittiä. Usein tehokkain lentoreitti kulkee pitkinä linjoina, jotka lennetään edestakaisin.

UAV-kuvauksella saadaan paikattua normaalin kartoituksen ja lentokoneesta suoritettavan kuvauksen väliin jäänyttä aukkoa. Sen avulla materiaali saadaan asiakkaalle jopa muutamien päivien varoitusajalla. Lentokoneesta kuvattaessa materiaalin saanti asiakkaalle kestää usein huomattavasti kauemmin. Yleisesti voidaan todeta UAV-kuvauksen sopivan pinta-alaltaan sellaisille alueille, joiden

kartoittaminen maastotyöllä on liian työlästä, mutta liian pientä perinteisellä ilmakuvauksella tai laserkeilauksella tehtäväksi. (Nevalainen 2018.) Myös sään vaikutusta voidaan minimoida huomattavasti helpommin. Pilvisellä säällä UAV:llä kuvaaminen onnistuu mainiosti, sillä niillä lennetään pilvien alapuolella.

Mitattavan alueen koon ollessa sopiva esimerkiksi kolmiulotteista mittausdataa saadaan nopeammin ja halvemmalla perinteisiin mittausmenetelmiin verrattuna. UAV:llä voidaan saada mitattua noin kahden neliökilometrin alue yhden työpäivän aikana. Maastomittauksiin verrattuna UAV:llä pystytään tuottamaan dataa huomattavasti tehokkaammin silloin, kun mitattava alue on hehtaaria suurempi mutta kuitenkin liian pieni lentokoneesta tehtävälle mittaukselle. (Nevalainen 2018.)

Kameran kalibrointiparametrien (sisäinen orientointi) täytyy olla tiedossa, että laskenta saadaan suoritettua. Kameran kalibroinnin pystyy suorittamaan ennen tai jälkeen kuvaustehtävän tai suoraan kuvaustehtävän kuvista itsekalibroinnilla (self-calibration). UAV:sta suoritettavassa kuvauksessa fotogrammetriaa hyödyntävät laskentaohjelmat etsivät automaattisesti kuvien paikat ja suunnat (ulkoisen orientointi), sekä määrittää kameran kalibroinnin arvot käyttäen itsekalibrointia (sisäinen orientointi). Prosessia kutsutaan (automaattiseksi) ilmakolmioinniksi (AAT). (Teittinen 2017, 16; Colomina & Molina 2014, 90.)



Kuvio 1. Kuvapeiton periaate (Jakobsen, 5)

Georeferoinnilla tarkoitetaan kuvan sijainnin osoittamista maastokoordinaatistoon. Georeferoidun kuvan kaikkien pisteiden sijainti luonnossa voidaan määrittää. Tuki- eli kiintopisteitä jotka ovat koordinaateiltaan tunnettuja pisteitä (GCP) käytetään mallin orientointiin. Yleisimmin ne rakennetaan maastoon, mutta myös luonnollisia pisteitä voidaan käyttää, mikäli ne ovat selkeitä ja erottuvat hyvin kuvilta. Ne signaloidaan ja mitataan huolellisesti, jotta laskentavirheitä saadaan minimoitua. Näiden pisteiden avulla ilmakuvaien keskinäinen orientointi saadaan sidottua ulkoiseen koordinaatistoon ja kuvanottoaikkojen sekä liitospisteiden sijainti saadaan ratkaistua. Saman pisteen täytyy löytyä vähintään kahdelta eri kuvalta. Näitä kiintopisteitä käyttämällä saadaan parhaat tulokset myös kuvien keskinäisen orientaation selvittämiseksi. (Rantanen 2017, 13; Teittinen 2017, 19–20.)

3 UAV-KUVAUS

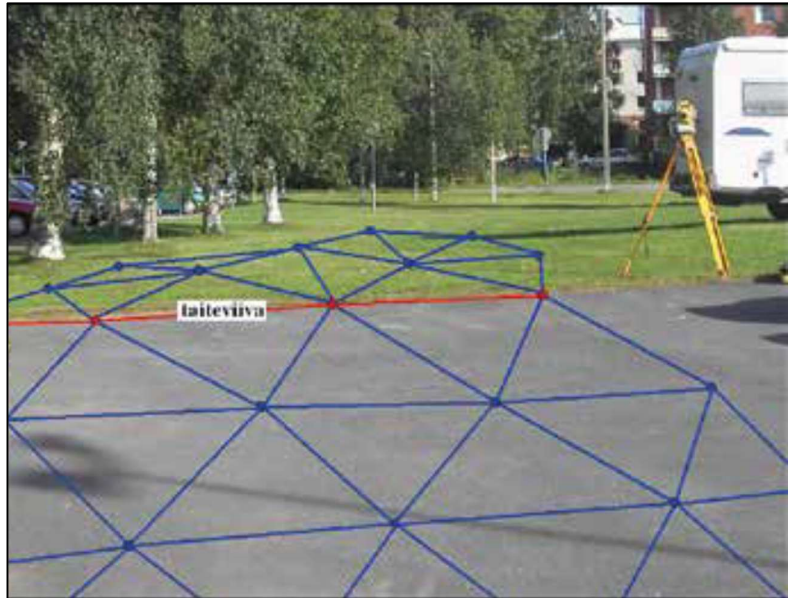
3.1 Kehitys ja nimikkeistö

Lennoikkien historia juontaa juurensa aina ensimmäiseen maailmansotaan asti, jolloin USA ja ranskalaiset koittivat kehittää itselentäviä koneita. Siitä asti niitä on kehitetty lähinnä sotilaskäyttöön eri muodoissaan. Nyt viimeisimpien vuosien aikana ne ovat tulleet nopeasti myös harraste- ja ammattikäyttöön ja palvelemaan monia eri alojen tehtäviä, jotka voidaan suorittaa lennokeilla, turvallisemmin, tehokkaammin tai muutoin hyödyttävällä tavalla. UAV:sta suoritettava tiedonkeruu on tällä hetkellä kasvavimpia paikkatiedon tuotantomuotoja. UAV:den käyttö kasvaa monella eri alalla ja luo myös paljon uutta teollisuutta.

Erilaisia UAV:sta käytettäviä nimityksiä on suuri määrä; UAV, UAS, RPAS, lennokki, drooni, drone jne. Tekniikan ollessa vielä melko uutta, alalle ei ole varsinaisesti vakiintunut vielä yhtä ja ainoaa käytettävää termiä. Varsinkin englanninkielisissä tieteellisissä julkaisuissa UAV näyttää olevan yleisesti käytetty. Maanmittauslaitos taas näyttää vakiinnuttavan drooni-sanana omiin uutisiinsa. Trafi käyttää termejä RPAS, kauko-ohjattava ilma-alus ja lennokki, käyttötarkoituksesta riippuen (Luku 3.4). Kielitoimiston sanakirjan kesällä 2018 ilmestyvään versioon ollaan lisäämässä sana: drone eli drooni. He ovat kyselleet myös mielipiteitä siitä, millä nimellä kuljettajaton pienoislentolaitetta pitäisi kutsua. (Positio-lehti 2018; Klemettinen 2018.)

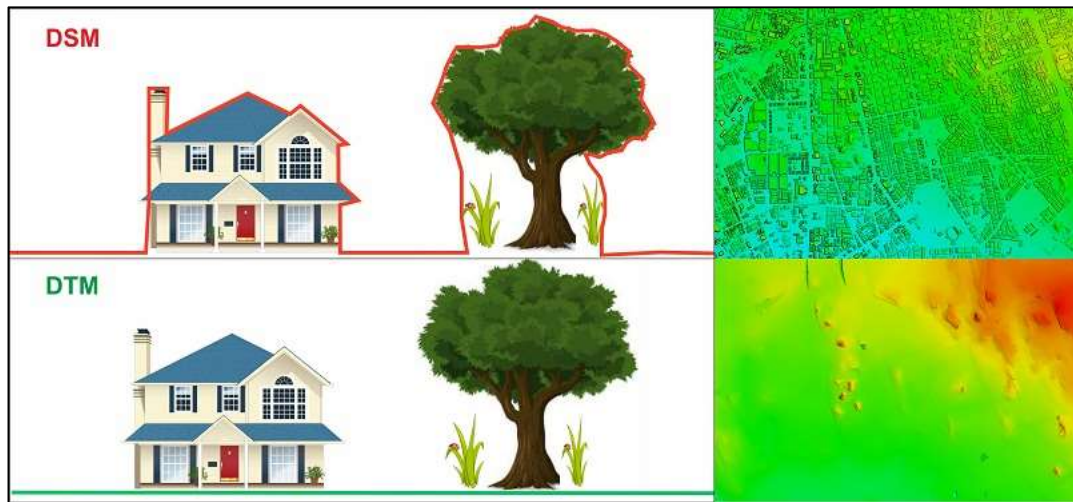
3.2 Maanmittausalan käyttöön saatavat tuotokset

UAV:llä otetuista kuvista voidaan fotogrammetrisin keinoin luoda monia erilaisia aineistoja. Mikäli aineisto on kerätty oikeaoppisesti, voidaan siitä tehdä todella tarkkoja ortokuvia, kolmiulotteisia pintamalleja, pistepilviä tai muita visualisointeja. Esimerkiksi kunnissa UAV:stä kerättyä materiaalia käytetään 3D-kaupunkimallien muodostamisessa, kantakartan suunnittelussa ja markkinoinnin apuvälineenä (Nevalainen 2018).



Kuvio 2. Esimerkki kolmioverkosta maan pinnalla (Laurila 2012, 256)

Pintamalli kuvaa maaston ylimmälle korkeustasolle asetettua pintaa. Se sisältää maanpinnan korkeuksia ainoastaan paikoissa, joissa on harvaa kasvillisuutta tai avomaata. Muilla alueilla pinta noudattaa metsän latvustoa ja rakennusten kattoja. Maastomallilla taas tarkoitetaan maanpintaa kuvaavaa mallia, joka kuvaa maaston korkeudet jatkuvaksi pinnaksi mallinnettuna. Se voi sisältää korkeustiedon lisäksi muitakin tietoa esimerkiksi maan peitteestä, rinteiden kaltevuuksista ja viettosuunnista. Mallintamisen jälkeen alueelle voidaan laskea esimerkiksi korkeuskäyrät ja erilaisia poikkileikkauksia tai tehdä muita visualisointeja. Tällaisten tuotosten lähtökohtana voi olla esimerkiksi takymetrillä mitattu pisteaineisto (Kuviot 2 ja 3) tai UAV:stä otetut kuvat. (MML 2018; Laurila 2012, 6.)



Kuvio 3. Pintamallin (DSM) ja maastomallin (DTM) eroavaisuudet (Satpalda 2018)

3.3 UAV:n muu ammatti- ja harrastekäyttö

Miehittämättömiä ilma-aluksia käytetään todella laajasti eri aloilla. Kehitys menee eteenpäin todella nopeasti, eikä moni varmaan ajattelekaan, kuinka monessa paikassa niitä jo käytetään. Tässä muutamia esimerkkejä: kiinteistönvälitysyritykset käyttävät kuvia alueista tai rakennuksista markkinoinnin tukena. Uutiskanavat käyttävät omia UAV:ta, joilla ne kuvaavat tuoretta kuvaa tapahtumista ja uutisaiheista. Metsiä kartoitetaan ja tilavuuksia lasketaan. Peltojen ravinnetilannetta voidaan seurata infrapunakameroilla ja kohdentaa lannoitusta tarpeen mukaan. Infrapunakameralla kuvattaessa pellostä voi löytyä joku sitä vaivaamaan tuleva tauti, ennen kuin se olisi ihmissilmällä havaittavissa.

Kadonneita ihmisiä etsitään ilmasta käsin lämpökameran avulla. Lentoalueen koko on kuitenkin suuresti rajoittava tekijä. Vakuutusyhtiöt käyttävät UAV:ta esimerkiksi myrskytuhoja tarkastellessaan. Myös sähköyhtiöt ovat alkaneet tarkistaa linjojen kuntoa lennokkien avulla. Australiassa on tehty hengenpelastusoperaatioita pudottamalla UAV:sta kellukkeita.

Urheilulajien harrastajat käyttävät lennokkeja kuvatakseen esimerkiksi laskettelua tai pyöräilyä aivan uusista kuvakulmista. Monissa uusimmissa kalliimman hintaluokan koptereissa on Follow Me -toiminto, jolla kopteri seuraa automaattisesti kohdetta ja ottaa kuvia tai videota. Monissa laitteissa voi myös suunnitella kuvausohjelman etukäteen, ja UAV kulkee haluttua reittiä pitkin, samalla kääntäen kameraa ohjelman mukaan. (Hassinen 2016.)

Pienillä, kämmenen kokoisilla lennokeilla kilpaillaan jo ympäri maailman. Kerhoja jotka järjestävät kisoja, on jo yli 700. Näissä kilpailusarjoissa käytetään ns. FPV-droneja (first person view) ja ohjaajalla on päässään videolasit, joihin lennokissa oleva kamera lähettää reaaliaikaista kuvaa, eli hän on ikään kuin lennokin ohjaamossa. Ohjaus tapahtuu kuvan perusteella. Laseihin on saatavissa myös asennotunnistimia, jolloin pään kääntäminen kääntää myös koneessa olevaa kameraa, joten lentotutuntuma on vieläkin aidompi. FPV-lennätyksessä täytyy käyttää analogista videolinkkiä, jotta viive on tarpeeksi pieni ja tarkka radan läpi lentäminen ja esteiden kiertely onnistuu. (Multi GP drone racing 2018.)

Rakennusyritykset käyttävät siltojen ja rakennusten tarkastuksiin hankalissa paikoissa. Kuljetusyritykset, kuten Amazon, UPS, DHL, Royal Mail ovat tehneet onnistuneita testejä pakettien kuljettamiseksi. Lähivuosina Dubaissa suunnitellaan otettavan käyttöön itse lentävä lennokki, joka kantaa yhden henkilön 100 kg asti. Kuljetettava istuu sisään ja osoittaa näytöltä haluamansa määränpään. USA:n armeija on lähettänyt lentoon 103 kpl parvessa lentäviä UAV:ta hävittäjästä käsin, useat yritykset ovat testanneet ruokakuljetuksia lennokeilla, useiden maiden poliisit ovat ottaneet käyttöön lennokkeja rikospaikkojen kuvauksiin, kadonneiden ihmisten etsintään, katastrofien seurantaan (Business insider 2017; Christina Mercer 2018.)

3.4 Trafin ja EU:n säädökset

Nykyisellään suomen ilmatilassa lennettävien miehittämättömien ilma-alusten säädöksistä vastaa Trafi. Voimassa oleva määräys OPS M1-32 kauko-ohjatuista

ilma-aluksista ja lennokeista astui voimaan 1.1.2017. Nyt työn alla on EU-tasoinen lainsäädäntö, jonka on tarkoitus tulla voimaan vuoden 2019 alusta, mikäli sen läpivienti pysyy aikataulussa.

Suomessa on yksi maailman liberaaleimpia UAV-lainsäädäntöjä. Lentäminen asutulla alueella on tarkemmin säädeltyä ja se vaatii turvallisuusarvion laatimisen ja omaan toimintaan laaditun toimintakäsikirjan. Lisäksi asutulla alueella UAV:n täytyy olla silmillä havaittavissa ja lentoonlähtömassan täytyy olla alle 7 kg. Kaupunkien läheisyydessä olevat lentokentät ja Puolustusvoimilta mahdollisesti tarvittava ilmakuvauslupa asettavat erityisiä vaatimuksia sallituille lentoalueille. Turvallisuuden lisäksi huomioitavia seikkoja ovat yksityisyyden suoja ja kotirauha. (Nevalainen 2018; Trafi 2018b.)

Euroopan komissio antoi vuonna 2015 Euroopan ilmailuturvallisuusviranomaiselle EASA:lle tehtävän luonnostella koko EU-alueelle yhteiset lennokkeja koskevat määräykset. Helmikuussa 2018 EASA luovutti EU:lle esityksensä kauko-ohjattavien ilma-alusten määräyksistä. Sen on määrä tulla voimaan vuoden 2019 alusta. Siirtymäajat vaihtelevat määräysten osien mukaan, mutta viimeistään kaikkiin määräyksiin olisi siirrytty kolmen vuoden sisällä, johon asti Suomessa noudatetaan OPS M1-32 -määräystä. Trafin edustusta on ollut mukana lainsäädännön laatimisessa ja kansallisia lievennyksiä on saatu mukaan. Tämä mahdollistaa sen, että UAV:lla tehtävä tiedonkeruu pysyy kustannustehokkaana, eikä tulevan lainsäädännön pitäisi heikentää toiminnan tehokkuutta (Lentsu 2018; Nevalainen 2018).

Suomessa lentotoiminnan säädöksistä vastaava Trafi määrittelee käytettävät termit käyttökohteen mukaan seuraavalla tavalla:

”Miehittämätön ilma-alus on ilma-alus, joka on tarkoitettu käytettäväksi ilman mukana olevaa ohjaajaa. Miehittämättömät ilma-alukset on usein myös varustettu joltain tiettyä tehtävää, kuten esim. valokuvaamista tai mittaamista varten. Miehittämättömien ilma-alusten alakategoria kauko-ohjatut ilma-alukset ovat miehittämättömiä ilma-aluksia, joita ohjaa kauko-ohjaaja (remote pilot) tai joiden toimintaan kauko-ohjaaja pystyy tarvittaessa puuttumaan.

Lennokit sen sijaan ovat harrastus- tai urheilutarkoituksessa käytettäviä, ilman ohjaajaa ilmassa liikkuvia laitteita. Lennokit voivat olla joko kauko-ohjattuja tai autonomisia, ns. vapaastilentävät lennokit. Sama laite voi olla joko lennokka tai kauko-ohjattava ilma-alus riippuen siitä, että mihin sitä käytetään kyseisellä Lennolla.” (Trafi 2018b.)

3.5 Valmiin aineiston vaatimukset

Työn tarkkuuden vaatimukset saadaan JHS-185 suosituksesta. Mittausluokka määrää mittaus- ja kuvaustarkkuuden. Korkeuskäyrällä olevan pisteen tai numeerisesta korkeusmallista interpoloidun pisteen korkeusvaatimukset ovat Taulukossa 1.

Taulukko 1. Korkeustarkkuusvaatimukset (JUHTA 2014b, 18)

Mittausluokka	Korkeustarkkuus, metriä
1e	≤ 0.08
1	≤ 0.12
2	≤ 0.20
3	≤ 0.40

Mittausluokkien käyttö kartoitusalueittain:

”Mittausluokka 1e: Kartoituksissa, joita on tarkoitus käyttää osana kunnan paikakatietojärjestelmää ja hyödyntää suurta tarkkuutta edellyttävässä teknisessä suunnittelussa, voidaan käyttää tarkempaa vaatimustasoa (mittausluokka 1e).

Mittausluokka 1: Taajama-alueet, joilla maa on erittäin arvokasta ja joilla on voimassa sitovan tonttijaon asemakaava tai rakennuskielto tällaisen asemakaavan laatimista varten.

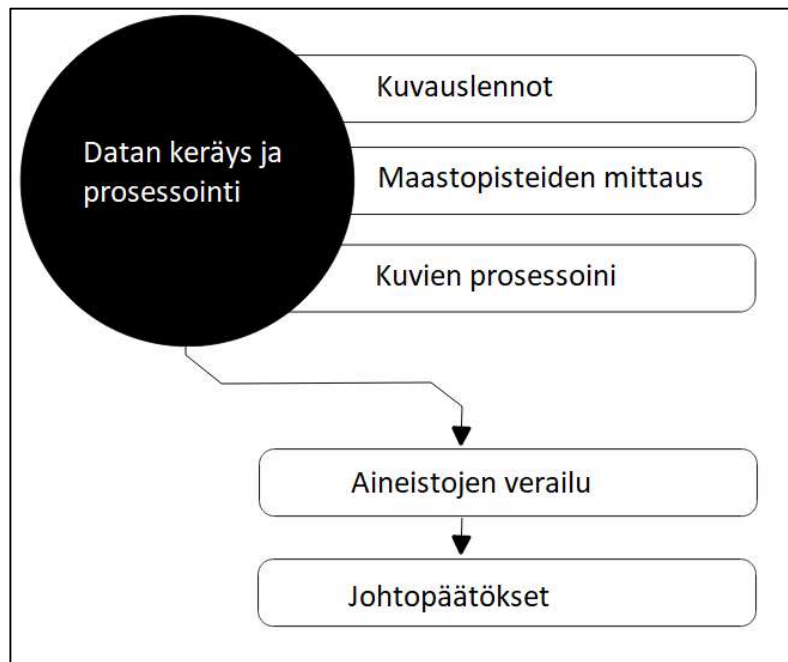
Mittausluokka 2: Taajama-alueet, joille laadittavassa asemakaavassa ei edellytetä sitovaa tonttijakoa.

Mittausluokka 3: Ranta-asemakaava ja ranta-alueet sekä muut sellaiset alueet, joilla maa on maa- ja metsätalousmaata selvästi arvokkaampaa, esimerkiksi ns. haja-asutusalueet.” (Juhta 2014a, 4; Juhta 2014b, 18.)

4 AINEISTON ESITTELY JA KÄSITTELY

4.1 Tutkittavan aineiston mittausten organisointi

Monesti UAV:llä fotogrammetrisia sovelluksia suoritettaessa kuvat otetaan pystysuoraan alaspäin. Niiden mahdollistama tekniikka on lisännyt mahdollisuuksia myös viistokuvauksen käyttämiseen, ja tässä työssä käytetyllä alueella on myös tutkittu viistokuvauksen käyttöä hyvin tuloksin (Mäcklin & Pahtaja 2018). Tässä työssä perehdytään pystykuvaukseen, sen tarkkuuteen ja tehokkuuteen. Riippumatta tehtävän suoritustavasta prosessi etenee (Puziene ym. 2016, 1–2) esittämällä tavalla (Kuvio 4).



Kuvio 4. Mittauksen kulku

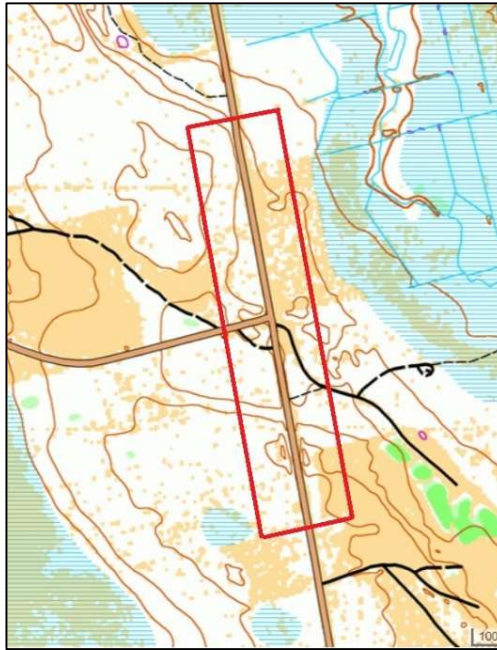
Syksyllä 2017 kuvattiin suunniteltu alue ja mitattiin pisteet maastossa. Kevään 2018 aikana perehdyttiin tarkemmin fotogrammetristen ohjelmien perusteisiin ja vertailulaskentojen suorittamiseen. Suunniteltaessa suoritettavia kuvauksia syksyn tulo ja sopivan lentosään odottelu asetti haasteita ajankohdalle. Mittauspäivää edeltävinä päivinä maasto oli lumeton, mutta mittauspäivää edeltävänä yönä ja aamupäivän aikana lunta satoi muutama senttimetri. Tienpinta oli lämmin ja

lumi ei jäänyt mitattavalle pinnalle, joten mittaukset voitiin suorittaa. Lennokkien suunnitteluun sään osalta on hyväksi todettu Ilmatieteenlaitoksen ylläpitämä Ilmailusää-palvelu (Ilmatieteen laitos 2018). Valinta 3 vrk lentopinnoilla ja korkeudeksi 1000ft sopii parhaiten lennökkikuvausten suunnitteluun (Tienhaara 2017). Trafilta varattiin ilmatila määräysten mukaisesti (Trafli 2018a, 3.)

4.2 Testipaikan kuvaus

Monissa maissa, kuten Suomessakin UAV-kuvauksen alueen koon rajoittavana tekijänä toimii lentämismääräykset. Suomessa korkein sallittu lentokorkeus on 150 metriä, ja ilma-aluksen on pysyttävä koko ajan silmillä havaittavissa (Trafli 2015). Mitattavan alueen kasvaessa toiseksi rajoittavaksi tekijäksi nousee akku-tekniikka, jonka aiheuttama suhteellisen lyhyt lentoaika rajaa lentojen pituuden kopterityyppisissä UAV:ssa yleensä 15 minuutin luokkaan, vaikka havaittava alue olisi kattava. Niin sanotuissa ”fixed wing” -tyyppisissä lennokeissa lentoaika voi olla kuitenkin pidempi, koska akkujen energiaa ei kulu koneen ilmassa pitämiseen.

Kuvattu alue oli kooltaan 180 m leveä ja 600 m pitkä, suora tieosuus. Se sijaitsee Kiimingin ja Yli-lin välisellä Kiimingintien varrella, tarkemmin Liippaantien risteyksessä (Kuvio 5). Alueen keskeltä kulkee harvakseltaan liikennöity tie, maasto on suhteellisen tasaista ja siellä kasvaa harvaa mäntymetsää. Alueella ei ole rakennuksia. Mitattu alue oli verrattain pieni ja kaukaisimmat signalointipisteet sijaitsivat 345 metrin päässä toisistaan. Kuvia otettiin siis hieman tarvittavaa pidemmältä alueelta. Lennokin lentoaika ja mitattavan alueen näkyvyys olisi mahdollistanut isommankin testialueen kuvaamisen, mutta emme katsoneet sitä tarpeelliseksi tutkimuskysymyksen huomioon ottaen.



Kuvio 5. Punaisella rajattuna kuvattu alue (Antmap 2018)

Työssä käytetyt menetelmät täyttävät Liikenneviraston antaman Tie- ja ratahankkeiden maastotietojen mittausohjeessa esitetyt vaatimukset UAS-kartoituksen mittaustavan osalta muutoin, paitsi pituuspeiton osalta. (Liikennevirasto 2017, 23.)

4.3 Referenssiverkko

Jotta ilmakuvilta laskettava pistepilvi saadaan orientoitua koordinaatistoon, täytyy maastoon rakentaa maastotukipisteitä (GCP), jotka erottuvat selvästi kuvilta. Maastoon lyötiin 4 kpl, 60 cm kokoisia valkeita signaaleja (Kuvio 6). Samalla maastoon lyötiin myös pisteet, joita käytettiin takymetrin orientoimiseen. Lähtö- ja tukipisteiden rakentamisen jälkeen mittaukset suoritettiin Trimble R10 -satelliitivastaanottimella, jonka sijaintitarkkuus on 8 millimetriä ja korkeustarkkuus 15 millimetriä (Trimble 2018). Pisteet mitattiin kiintopistemittauksina kolmesta eri suunnasta ja mittaustulokset keskiarvoistettiin, jotta takymetrin orientointiin käytettävät pisteet olisivat varmasti riittävän tarkkoja. Koordinaattijärjestelmänä mitauksissa käytettiin ETRS-GK26FIN -järjestelmää ja korkeusjärjestelmänä N2000 -järjestelmää.



Kuvio 6. Signalointipiste

Referenssiaineisto mitattiin Trimble S6 -takymetrillä. Sen kulmatarkkuus on 1 milliooni ja etäisyysmittauksen tarkkuus alle 300 metrin matkalla 3 mm (Trimble 2013). Takymetri orientoitiin tehtyjen lähtöpisteiden avulla sopivalle sijainnille ja alueelta mitattiin 167 pistettä. Pisteet mitattiin noin 5 metrin välein tien reunoista ja keskilinjalta, aina mahdollisuuksien mukaan tiemaalauksien päältä, jotta korkeustarkkuus olisi mahdollisimman tarkka. Näiden pisteiden avulla vertailimme tutkimustuloksia. Kuviossa 7 referenssipisteet erottuvat keltaisina, signaloidut pisteet punaisina ja orientointipisteet sinisinä.



Kuvio 7. Satelliittivastaanottimella ja takymetrillä mitatut pisteet (MML)

4.4 Mittauslennot

Mittauspäivän iltapäivällä keli selkeni lähes pilvettömäksi ja pystyimme suorittamaan lennokkimittaukset lämpötilan ollessa pari astetta lämpimän puolella. Maa-Ilmasta Oy käyttää ”fixed wing”-tyyppistä AeroTekniikka-M017 -lennokkia. Kuvauskalustona oli Sony RX1RII (Taulukko 2).

Taulukko 2. Kameran ominaisuudet (Sony 2018)

Parametri	Arvo
Kameran malli	Sony DSC-RX1RM2
Kenno	35mm
Megapikseleitä	42,4 MP
Objektiivi	ZEISS® Sonnar T*, kiinteä
Polttoväli	f=35mm
Aukon koko	F/2
ISO herkkyys	100-25 600
Valotusaika	30”–1/4000
Paino akun kanssa	507g

Alue lennettiin kaksi kertaa. Ensimmäisellä lennolla autopilottiin asetetut kääntösäteet linjojen päissä jäivät liian jyrkiksi ja lennokki ei ennättänyt kääntyä mitatavalle lentolinjalle riittävän pienellä säteellä. Kuvista tuli hyviä, mutta ne eivät olleet riittävän symmetrisissä jonoissa. Toiselle lennolle kuvausreittiä jatkettiin päistä pidemmäksi, että lennokilla oli riittävästi aikaa tehdä käännös ja palata takaisin suunnitellulle reitilleen. Aineisto mitattiin 130 m lentokorkeudelta, jolla saavutettiin 17 mm maastoresoluutio (maastopikselikoko, GSD) ja kuvan koko maastossa oli 89 * 133 metriä.

Kuvaus suoritettiin käyttäen 93 % sivupeittoa ja 52 % pituuspeittoa. Kuvausjonoja tehtiin 11 kpl, joten linjaväliksi tuli vajaa 9 m (Kuvio 8). Kuvia otettiin noin 42 m välein jokaiselta linjalta ja näin alueelta saatiin 177 kpl onnistuneita kuvia. Iltapäivän myöhäisestä kuvausajankohdasta johtuen aurinko oli jo laskenut matalaan kulmaan ja kuviin tuli pitkiä varjoja.

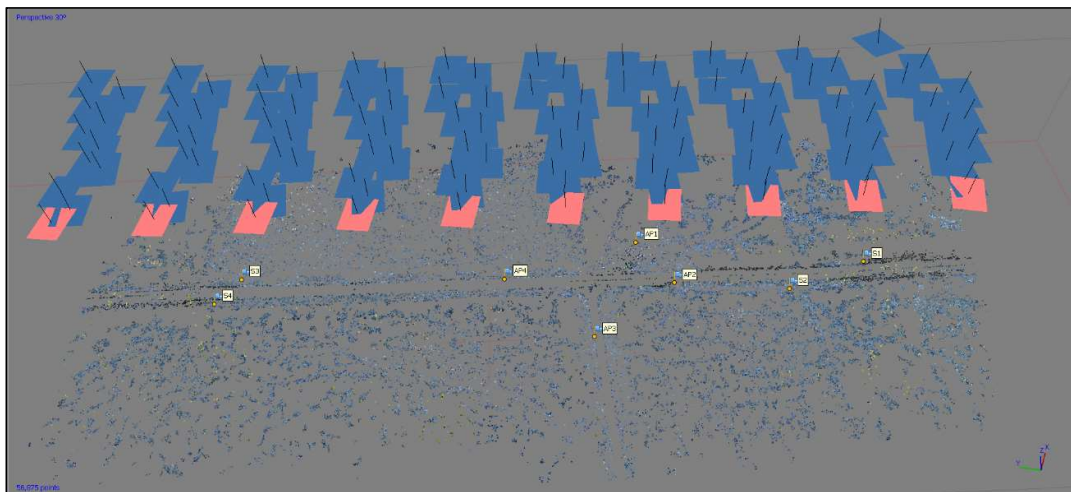


Kuvio 8. Autopilotin näkymä lennon aikana

4.5 Kuvien valinta pilvien muodostamiselle

Lennosta saatiin 177 kpl kuvia. Nämä kaikki avattiin Photoscaniin, tehtiin orientointi ja laskettiin harva pistepilvi tarkkuuden matalimmalla asetuksella. Näin saatiin kuvien sijainnit näkymään kolmiulotteisessa näkymässä ja voitiin valita las-

kennassa käytettävät yksilöt. Ensin kuvatun alueen päistä poistettiin joukko kuvia, jotka olivat kuvautuneet vinosti maahan nähden ja näin kuvasivat alueita, joilla ei ollut tämän työn kannalta merkitystä. Tämä johtui luvussa 4.4 esitetystä ison lennokin vaatimasta kääntösäteestä. Tämän jälkeen kuvat lokeroitiin omiin kansioihinsa kuvauslinjan perusteella, jotka pääteltiin kuvien tiedostonimistä ja sijainneista. Näin jäljelle jäi 11 lentolinjaa, joista jokainen sisälsi reilu kymmenen kuvaa. Tukipisteiden perusteella etsittiin kuvauslinjojen keskikohta, jonka avulla kuvien joukkoa tarkastelemalla huomattiin, että kuvia on vielä tarpeettoman pitkällä matkalla. Kuvausjonot koitettiin saada mitattujen tukipisteiden keskikohdan kanssa mahdollisimman lähelle toisiaan ja keskimäinen lentolinja seuraamaan tietä. Näin linjojen päistä poistettiin vielä muutamia kuvia ja kaikki 11 jonoa tulivat sisältämään 10 kuvaa. Kaikkiaan kuvia tuli siis 110 kpl, jotka sijaitsivat kohtalaisen symmetrisesti toisiinsa nähden (Kuvio 9).



Kuvio 9. Kuvien sijainnit. Laitimmainen lentolinja punaisina kuvina

4.6 Pistepilvien generointi

Kuvien fotogrammetrisessa laskennassa käytettiin Agisoft Photoscan Professional (versio 1.4.1) -ohjelmistoa. Sen kehitys on aloitettu 2006 ja sillä voidaan laskea kuvista pistepilviä fotogrammetrian menetelmin, tehdä maanpinnan korkeusmalleja, 3D-malleja, laskea tilavuuksia ja muokata kaikkia näitä aineistoja. Tutkimuksessa käytetyn Professional-version hinta on 3499 dollaria. Siitä on kuitenkin

saatavilla ilmainen kuukauden kokeiluversio, jonka avulla tämän työn laskennat suoritettiin. (Agisoft 2018a.)

Photoscan on tutkimuksessa osoitettu tarkimmaksi fotogrammetristen tuotosten luomisessa (Pagliari, Pinto & Sona 2014, 1; Eltner & Schneider 2015, 290; Delacourt ym. 2016, 16). Ohjelmistot ja uudenlainen digitaalinen fotogrammetria kehittyi sellaista vauhtia, että neljä vuotta vanhan tutkimuksen tuloksiin täytyy suhtautua kriittisesti. Yrittäjien tiedossa kuitenkin on, että muut sovellukset eivät olisi yhtä hyviä tähän käyttötarkoitukseen. (Tienhaara 2017.)

Laskentakone koostui seuraavista osista: RAM 8 GB, Prosessori Intel Core i7-8550U CPU @ 1.80GHz, Näytönohjain AMD Radeon RX 550 2GB ja järjestelmä Windows 10 (64 bit). Agisoftin muistivaatimustaulukkoa tarkastelemalla huomattiin, että kuvien määrässä ja tarkkuudessa liikuttiin jo laskentakoneen tehojen rajamailla. Tarkimman pistepilven, jossa oli 110 kpl kuvia, laskeminen kesti noin seitsemän tuntia (Agisoft 2018b).

Jotta eri kuvajoukoista laskettuja malleja voitiin luotettavasti vertailla toisiinsa, käytettiin jokaisessa laskennassa samoja asetuksia. Ensin ladattiin kaikki hyvälaatuiset yhden lennon kuvat ja suoritettiin nopea orientointi, että saatiin selville kameroiden paikat. Tämän jälkeen kameroiden sijainnista poistettiin ylimääräiset tai liiat kuvat, että jäljelle jäi kuhunkin verrattavaan laskentaan sopiva kuvajoukko. Ensimmäisessä vaiheessa suoritettiin ulkoinen orientointi, jolla selvisi kameroiden sijainnit ja kalibroinnit sekä muodostettiin harva yhtenevien pisteiden etsintä. Tässä image matching option: high; 60 000 ja 4000 Tällä prosessilla saatiin aikaan harva pistepilvi (Sparse cloud), joka selvitti kamerasen kalibrointi-arvot sekä kuvien paikat ja suunnat. Tämän jälkeen voitiin osoittaa mitattujen orientointipisteiden sijainti kuvilta. Kun pisteet oli tarkistettu ja siirretty kohdalleen jokaiselta kuvalta, voitiin ladata pisteille koordinaatit, jotka saatiin aiemmin signaloiduista ja myös takymetrin orientointiin käytetyistä pisteistä. Kun nämä tiedot saatiin syötettyä, tehtiin vielä orientointien tarkistus (Optimize cameras). Sitten tehtiin tiheän pistepilven laskenta (Dense cloud). Jokaisessa laskennassa käytettiin PhotoSca-

nin asetuksia; Quality parameter High, Depth filtering arvo Aggressive. Aggressive valittiin, koska se sopii laskentaan, jossa ei ole teräviä kulmia, kuten rakennuksia. Lisäksi sillä saataisiin poistettua hieman kohinaa tien pinnasta (Tienhaara 2018). Muut asetukset pidettiin oletusasetuksina. Mesh-mallin laskennassa käytettiin seuraavia asetuksia: Surface type: Height field (2.5D), Source data: Dense cloud, Face count: High. Muut asetukset pidettiin oletusasetuksina

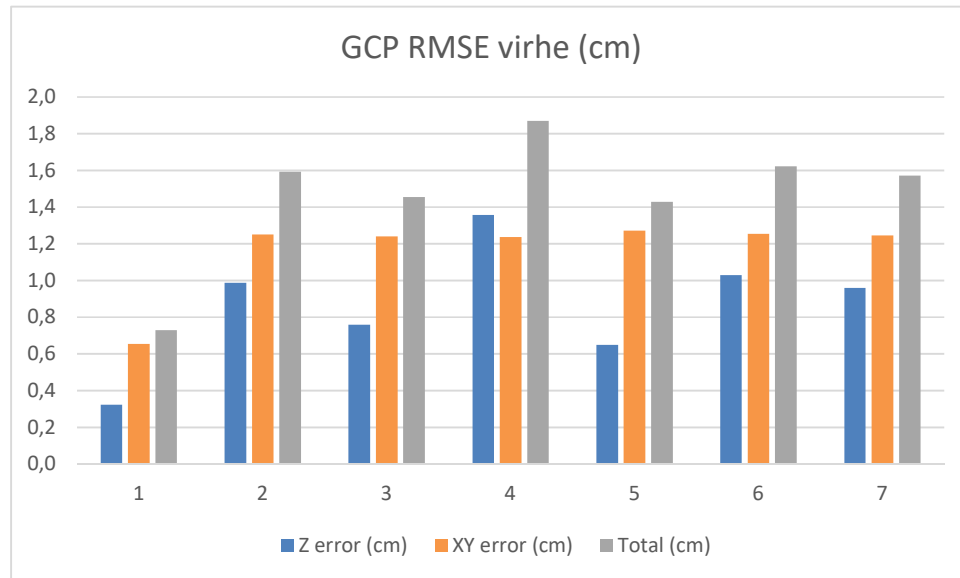
Tarkimmasta aineistosta saatiin 101 miljoonaa pistettä. Kuvia tässä laskennassa oli 110 kpl ja sen tiheän pistepilven laskemiseen kului noin seitsemän tuntia. Eri laskentojen sivupeittoa säädeltiin vaihtamalla valittuja kuvauslinjoja. Kaikkiaan työssä käytettyjä laskentoja tuli 7 kappaletta. Tarkimmasta aineistosta laskettua kolmioverkkoa käytettiin toisena referenssiaineistona tuloksia vertailtaessa.

Taulukoista 3 ja 4 selviää kaikkien seitsemän lasketun pistepilven tiedot ja tukipisteiden virheet. Kaikissa pistepilvissä tukipisteiden virheet olivat alle 2 cm. Aineistoja oli tarkoitus laskea myös pienemmällä pituuspeitolla, mutta kuvasprosessissa vajaaksi jäänyttä 52 % pituuspeittoa ei voitu lyhentää. Kuvapeiton ollessa näin niukasti yli 50 %, vaarana olisi ollut, että mäkisessä maastossa olisi syntynyt alueita, jolle ei olisi saatu riittävästi peittoa. Kuvatun alueen maasto oli hyvin tasaista ja lasketun aineiston hyödynnetyt pisteet sijaitsivat korkeuden osalta neljän metrin sisällä toisistaan.

Taulukko 3. Laskentojen tiedot

Nro.	Kuvia	Lentolinjat	Sivu- ja	RMSE			Image (pix)
			pituuspeitto	XY error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	
1	10	1	0% / 52%	0,66	0,32	0,73	0,118
2	20	2	61% / 52%	1,25	0,99	1,59	0,216
3	30	3	80% / 52%	1,24	0,76	1,45	0,283
4	30	3	67% / 52%	1,24	1,36	1,87	0,355
5	50	5	87% / 52%	1,27	0,65	1,43	0,340
6	70	7	93% / 52%	1,25	1,03	1,62	0,334
7	110	11	93% / 52%	1,25	0,96	1,57	0,371

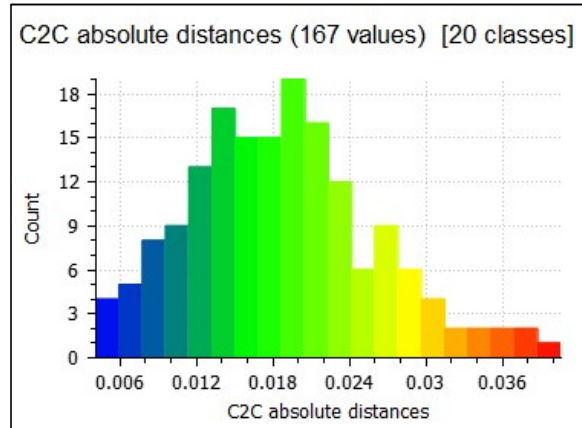
Taulukko 4. Tukipisteiden RMSE



4.7 Aineistojen vertailu

Työssä laskettujen pistepilviaineistojen vertailut suoritettiin CloudCompare-ohjelmalla. Se on avoimeen lähdekoodiin perustuva ja suunniteltu alun perin pistepilvien vertailuun. Sitä on kehitetty vuodesta 2004 ja julkiseen käyttöön se tuli vuonna 2009. Siihen on tehty lukuisia Plug-in-sovelluksia erilaisiin käyttötarkoituksiin. Sillä voidaan vertailla pistepilviä ja kolmioituja aineistoja keskenään ja tehdä näistä havainnollisia esityksiä näyttämään aineistojen eroavaisuudet. (CloudCompare 2018.)

Kaikkiaan pistepilviä syntyi seitsemän kappaletta. Jokainen Photoscanilla laskettu pistepilvi avattiin ohjelmaan, leikattiin kattamaan vain tien luiskineen ja ulkopuolelle jäävät pisteet poistettiin. Suurimmat aineistot sisälsivät ennen käsitteilyä noin 101 miljoonaa pistettä. Poistamalla tiealueen ulkopuolelle jäävät pisteet, saatiin pisteiden määrä laskettua suurimmillaan noin seitsemään miljoonaan pisteeseen. Näin aineistojen tiedostokokoa saatiin merkittävästi pienennettyä ja ne tulivat kevyemmäksi käsitellä.



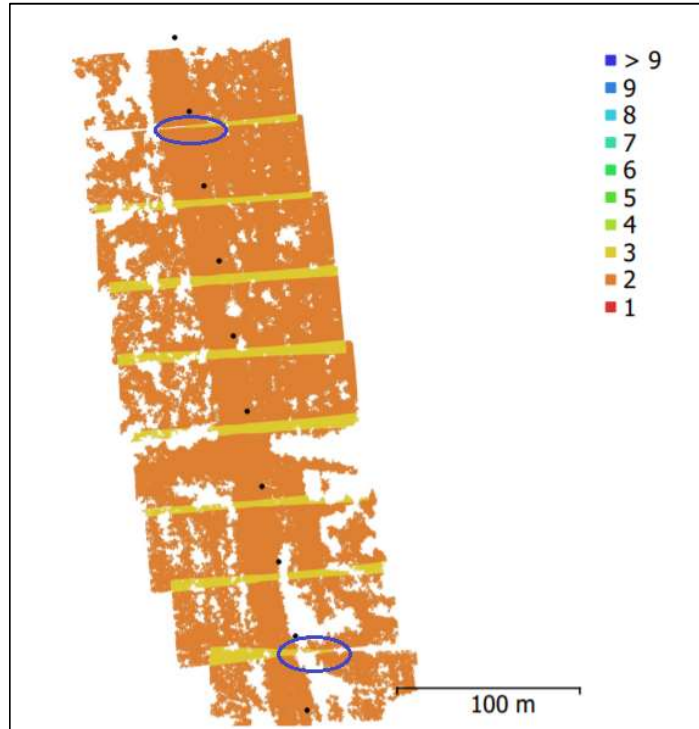
Kuvio 10. Referenssiaineistot verrattuna toisiinsa

Pistepilvet käytiin läpi yksi kerrallaan ja vertailtiin tuloksia takymetrillä mitattuun referenssiaineistoon sekä tarkimmasta laskennasta saatuun kolmioituun malliin. Tarkimman aineiston pistepilveä verrattiin takymetrillä mitattuun referenssiaineistoon ja saatiin selville, että kaikki pisteistä sijaitsivat 4 cm sisällä (Kuvio 10Kuvi).

Jokaisessa vertailussa käytettiin Compute cloud/cloud distance- ja Compute cloud/mesh distance -työkalun asetuksia; Octree level: 8 sekä asetettiin maksimi vertailuetaisyys 0,3 metriin ettei hieman erikokoisiksi leikattujen aineistojen reuna-alueiden suuret eroavaisuudet tulisi mukaan tuloksiin. Tarkemmin CloudCompare -ohjelman tapaan laskea pisteiden väliset eroavaisuudet voi perehtyä sen ohjeessa (CloudCompare, 29.)

Viimeisimpänä ja mielenkiintoisena kokeena suoritettiin laskenta reilusti vajavai- silla kuvapeitoilla. Agisoftin manuaalissa on sanottu sen kykenevän muodosta- maan pisteitä myös paikoista, joissa on vain kaksi kuvaa (Agisoft 2018c). Yhdellä ja kahdella lentolinjalla lasketuissa aineistoissa ongelmaksi muodostui pituuspei- ton puutteellisuus. Keltaisella ja oranssilla erottuvilla kuvapeittojen raja-alueilla on havaittavissa, että kuvauslinjan kuvat eivät ole aivan täydellisesti linjassa toi- siinsa nähden. Sinisellä ympyröidyillä alueilla, joissa ei ole kuvapeittoa, pisteitä ei muodostunut. (Kuvio 11). Tämä johtuu lennon aikana vallinneesta tuulesta,

joka on kääntänyt UAV:ta vinoon lentosuuntaansa nähden tai kameran asettelusta käytetyn lennokin rungon sisään. Aineistossa, jossa ei ollut sivupeittoa ol-
lenkaan, tien pinnan pisteitä sijaitsi ± 20 cm alueella. Pistepilvestä oli kuitenkin selvästi löydettävissä nollapinta. Suurempien sivupeittojen laskennoissa matalasta pituuspeitosta ei ole muodostunut haittaa kuten tässä.



Kuvio 11. Yhdellä lentolinjalla lasketun aineiston kuvienottopaikat ja päällekkäisten kuvien määrä. Kuvassa tie kulkee mustilla pisteillä merkattujen kuvanotto-
paikkojen alla

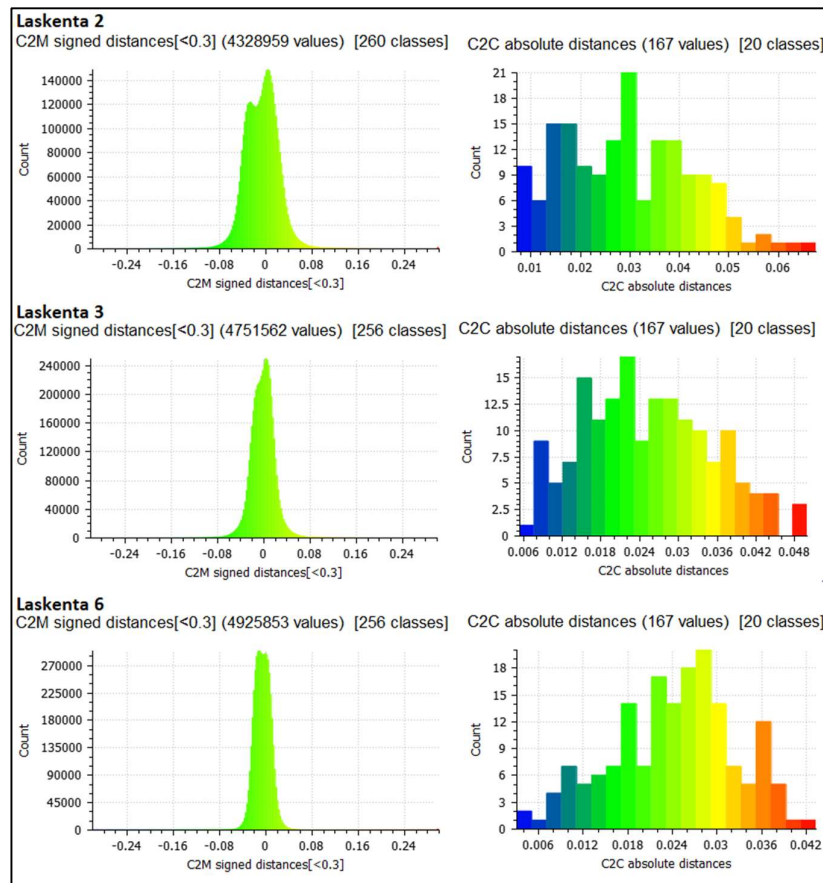


Kuvio 12. Ensimmäisen laskennan kolmioitu aineisto

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Tulokset

Tutkimus UAV-kuvauksen kuvapeiton vaatimuksista on suoritettu lentämällä testiaineisto 130 m korkeudelta GCP:n ollessa noin 1,7 cm. Kuvista laskettiin seitsemän pistepilveä. Tuloksia ja niiden laatua verrattiin kahdella eri mittarilla: Photoscanin antamasta raportista saatavilla tukipisteiden RMSE-arvoilla ja CloudCompare -ohjelmalla pistepilviä verrattiin referenssiaineistoihin. Referenssiaineistona käytettiin takymetrillä tien pinnasta mitattuja 176 pistettä ja 110 kuvasta laskettua kolmioverkkoa. RMSE-lukemia vertailemalla pistepilvien laadusta ei saanut luotettavaa tietoa (Taulukko 4). Referenssiaineistoihin verrattaessa pisteiden sijaintitarkkuuden jakauma tuli selkeästi esille (Kuvio 13).



Kuvio 13. Laskentojen 2, 3 ja 5 tarkkuudet. Vasemmalla verrattuna kolmioituun maliin ja oikealla takymetrillä mitattuun referenssiin

Taulukosta 3 selviää tulosten tukipisteiden keskinäinen RMSE-vertailu. Korkeus-tarkkuutta kuvaava RMSE-Z (Z-error) -riviä katselemalla voidaan huomata, ettei siinä tapahdu juuri muutoksia. Virheen määrällä ei näytä olevan suoraa yhteyttä, kun pituuspeitto pysyy vakiona ja vain sivupeittoa muutetaan. Myöskään se ei kasva loogisesti kuvapeiton lisääntyessä. Yhdistettyä X- ja Y-suunnan (XY-error) virhettä kuvaava lukema näytti pysyvän melko samankaltaisena riippumatta kuvapeittojen suunnista ja määristä.

Yksistään RMSE-virheitä tarkasteltaessa ei voida päätellä koko totuutta saadun aineiston laadusta. Myös tuloksia arvioitaessa täytyy ottaa huomioon, että tässä työssä saadut tulokset kuvaavat asfaltin pinnan laskentaa ja niiden pisteiden mit-taustarkkuutta. Työssä ei otettu huomioon sään tai lentokorkeuden muutosten vaikutuksia. Laskentaa suoritettaessa ja tuloksia vertailtaessa huomattiin kuvaus-päivänä vallinneen sään ja tästä johtuvan asfaltin kosteuden ja pienien sävyero-jen aiheuttavan kohinaa pinnoilla, jotka olivat kauttaaltaan tasaisia ja mustia. Hel-poiten tämä kohina oli havaittavissa kolmioidusta aineistosta. Tämä on tuttu ilmiö fotogrammetrisissa laskennoissa. Aineistoja käytettäessä niitä voisi suodattaa jollakin tarkoitukseen sopivalla ohjelmalla. Tähän tarkoitukseen sopii esimerkiksi RealWorks-ohjelmisto. Tässä työssä ei tutkittu aineiston laadun parantamista ai-neiston laskennan jälkeen.

Laskennoissa 1, 2, ja 4 pituuspeiton ollessa vähäinen ja sivupeiton tippuessa alle 80% pistepilvessä havaittiin selvää kohinaa. Laskentojen 2 ja 4 pisteet sijoittuivat suurimmaksi osaksi +/- 5 cm matkalle, mutta useita hajapisteitä oli +/- 10 cm mat-kalla. Laskennan 1 mallista ei tullut käyttökelpoista (Kuvio 12).

Laskennoista 3, 5, 6, ja 7, joissa sivupeitto oli yli 80 % saatiin odotetusti tarkimmat pistepilvet, jotka olivat myös visuaalisesti tarkasteltuna järkevän näköisiä. (Kuvio Kuvi). Laskennoissa 6 ja 7 sivupeitto on kuitenkin tarpeettoman suuri ja merkittä-vää parannusta aineiston laadussa laskentoihin 3 ja 5 ei syntynyt. (Taulukko 3, Kuvio 13).



Kuvio 14. Viidennen laskennan kolmioitu aineisto

Tekemällä vertailuja pistepilvien kesken saavutimme JHS-185-suosituksen luokan 1 vaativimman tarkkuuden 80 % sivupeiton omaavilla ja sitä tarkemmilla aineistoilla.

5.2 Kustannustehokkuus ja aineiston laatu

Kuvattava alue oli noin 180 m leveä ja 600 m pitkä. Signaaleja alueelle tehtiin 4 kpl. Orientointiin, pisteiden ja signaalien merkkauksiin ja referenssiaineiston mittaukseen alueelle kului noin kolme tuntia. Koneen kasaukseen, lennon valmisteluun, lentoihin ja muihin toimenpiteisiin kului noin kaksi tuntia. Lennoissa lentolinjojen reittiväli oli 9 m. Näin tiheä lentolinjojen etäisyys ei missään tapauksessa ole tarpeellinen eikä tehokas.

Maastotyöt ja mittaukset tällaisen alueen kuvaamiseksi voisi hyvin saada tehtyä vajaan työpäivän aikana, mikäli suurempia hidasteita ei osuisi tielle. Esimerkiksi viidennen laskennan suorittamiseen Agisoftilla kului aikaa nelisen tuntia. Tätäkin aikaa saa merkittävästi lyhennettyä tehokkaammalla laskentakoneella. Kun laskennan saa ohjelmassa päälle, se ei vaadi jatkuvaa seurantaa ja tänä aikana voi tehdä muita töitä.

Photoscanin käyttöoppaassa suositellaan ilmakuvausta tehtäväksi 60 % sivupeitolla ja 80% pituuspeitolla (Agisoft 2018c). Tässä työssä olleen matalan, 52 % pituuspeiton vaikutuksia on vaikea arvioida yksiselitteisesti, koska sivupeitto oli

kuitenkin suhteellisen korkea. Korkea sivupeitto on mahdollisesti korreloinut suositusta matalampaa pituuspeittoa. Laadukas kamera on myös edesauttanut tämän työn tuloksien laadussa.

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka kuvapeitot vaikuttavat fotogrammetristen laskentojen laatuun käyttäen Agisoftin Photoscan -ohjelmaa. Aineisto kerättiin yhteistyössä Maallmasta Oy:n kanssa AeroTekniikka-M017 -lennokilla. Laatua tarkasteltiin tukipisteiden RMSE-arvoja tarkkailemalla ja vertailemalla pistepilviä referenssiaineistoihin. Lähtökohtana oli tutkia työtä kustannustehokkuuden ja pistepilvien tarkkuuden osalta. Tavoitteena oli myös oppia UAV-ilmakuvauksen prosessi lentojen suunnittelusta valmiiden tuotosten vertailuun asti. Työ tehtiin kvantitatiivisen menetelmän avulla. Työhön kuuluu perusteita selventävä teoriaosuus ja pohdinta. Ensimmäiseksi tehtiin kirjallisuuskatsaus aiheeseen. Toisessa osassa suoritettiin aineiston keruu ja tutkimus. Agisoftilla suoritettiin kymmenkunta harjoituslaskentaa, jotta opittiin käyttämään ohjelmaa ja saatiin aikaan verrattavissa olevia ja luotettavia pistepilviä. Pistepilviaineistoja laskettaessa huomattiin pituuspeiton jääneen vajavaiseksi ja tästä syystä tutkimusta ei voitu suorittaa kuin sivupeiton osalta.

Tässä työssä ei niinkään keskitytty käytettävän ohjelman asetusten vaikutuksiin muodostettavan aineiston tarkkuuteen, vaan pistepilvien laatuun ja käytettyjen resurssien määrään mittausta suoritettaessa. (Viljanen 2017) on vertaillut työssään myös Photoscanin tarkkuuden asetusten vaikutuksia laskentojen tarkkuuksiin ja laskentaan tarvittavaan aikaan. Muiden käytettävien sovellusten mittaus-tarkkuutta, hinnan ja laadun suhdetta kustannuksiin voisi vertailla keskenään aiempien löydettyjen tutkimusten ollessa useampia vuosia vanhoja.

Jotta päästään hyviin tuloksiin kustannustehokkaasti, voidaan vastaavan aineiston keräämistä suorittaa esimerkiksi kolmella lentolinjalla. Lentolinjojen etäisyys toisistaan täytyy kuitenkin suunnitella huolellisesti, että kaikki GCP:t varmasti saadaan näkyviin tarpeeksi monelta kualta ja näin orientointi saadaan riittävän tarkaksi. Pituuspeitto on hyvä pitää yleisesti tiedossa olevassa 80 % lukemissa. Tällä voidaan välttää pituuspeittoihin syntyviä puutteita epätasaisemmalla mitauspaikalla ja puuskista johtuvia lennokin heilahduksia ja muita virheitä, jotka

voivat aiheuttaa epätarkkuutta aineistoon. On syytä pysyä Agisoftin, Liikenneviraston ja KMTK:n suosituksissa ositetuissa kuvapeiton 80/60 lukemissa, vaikka tässä työssä lyhemmällä pituuspeitolla saatiinkin hyviä tuloksia (Agisoft 2018c; Kansallinen maastotietokanta 2018; Liikennevirasto 2017).

Kameran ollessa tarpeeksi laadukas voidaan pitää lentokorkeus korkealla ja näin säästää lentoaikaa ja silti päästä hyviin GSD-lukemiin sekä kuvapeittoihin. (Cronk ym. 2012) on tutkinut RAW-muotoisten kuvien käyttöä JPEG-muodon sijasta ja osoittanut että tällä saataisiin parannettua tarkkuutta. Tässä työssä käytetyn kamerasen yksi kuva on noin 30 Mt kokoinen. Jatkotutkimuksissa voisi tutkia, onko kyseisen kameramallin RAW-muotoisten kuvien käytöstä merkittäviä etuja saatujen kuvien ollessa jo näin tarkkoja.

Näiden lisäksi myös säällä ja auringon korkeuskulmalla on merkitystä geometrisen prosessoinnin laatuun, kuten tässä työssä osoitettiin. Tästä syystä kuvauksia ei tulisi toteuttaa huonolla säällä, joka kuitenkin taistelee kustannustehokkuutta ja maastomittauskauden pituutta vastaan. Kuvauksia voisi ajoittaa mahdollisuuksien mukaan keskipäivään tasaisen auringon paisteen tai ohuen tasaisen pilvi-
peitteen aikaan.

LÄHTEET

Agisoft 2018a. Professional edition features. Viitattu 2.2.2018
<http://www.agisoft.com/features/professional-edition/>.

– 2018b. System requirements. Viitattu 31.1.2018
<http://www.agisoft.com/downloads/system-requirements/>.

–2018c. Agisoft PhotoScan professional edition user manual. Viitattu 23.4.2018
http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf

CloudCompare 2018. Introduction. Viitattu 17.1.2018 <http://www.cloudcompare.org/>.

Colomina, I. & Molina, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, 90. Viitattu 4.3.2018 <https://bit.ly/2lQu63Q>.

Cronk, S., Fraser, C.S. & Stamatopoulos, C. 2012. Accuracy aspects of utilizing RAW imagery in photogrammetric measurement. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5. Viitattu 24.4.2018 <https://bit.ly/2tFln0s>.

Delacourt, C., Grandjean, P., Jaud, M., Le Bivic, R., Le Dantec, N. & Passot, S. 2016. Assessing the Accuracy of High Resolution Digital Surface Models Computed by PhotoScan® and MicMac® in Sub-Optimal Survey Conditions. Remote Sensing 2016, Vol. 8, 465. Viitattu 28.3.2018
<https://doi.org/10.3390/rs8060465>.

Divya, J. 2017. Business Insider. Exploring the latest drone technology for commercial, industrial and military drone uses. Viitattu 22.2.2018
<http://bit.ly/2pv21aY>.

Eltner, A. & Schneider, D. 2015. Analysis of different methods for 3D reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images. Photogrammetric Record. Vol. 30, 279–299. Viitattu 15.3.2018
<https://doi.org/10.1111/phor.12115>.

Haggerén, H. 2002. Fotogrammetrian peruseet. Keskusprojektiokuvaus. Viitattu 25.4.2017. https://foto.aalto.fi/opetus/300/luennot/3/3_print.htm

– 2011. 200 vuotta fotogrammetrian ja kaukokartoituksen historiaa. The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 22, No. 3, 9–21.

Hassinen, A. 2017. UAV-lennokit ja -kopterit: Kokemuksia UAV- ja RPAS-laitteista. Viitattu 22.2.2018 <https://bit.ly/2v0lQeD>

Ilmatieteen laitos 2018. Ilmailusää. Viitattu 17.1.2018 <http://bit.ly/2FN6mNh>.

Jakobsen, K. 1998. Block Adjustment. University of Hannover. Viitattu 27.3.2018 <https://bit.ly/2l64YFP>.

JHS 185 2014. Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta. Viitattu 1.2.2017 <http://www.jhs-suositukset.fi/suomi/jhs185>.

JUHTA 2014a. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Viitattu 20.11.2017 <http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS185/JHS185.pdf>.

– 2014b. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Liite 4 Kohteiden kartoituksen laatuvaatimukset. Viitattu 21.11.2017 http://docs.jhssuositukset.fi/jhs-suositukset/JHS185_liite4/JHS185_liite4.pdf.

Kansallinen maastotietokanta 2018. Kuntien tuotantoprosessit: Selvitys RPAS menetelmistä. Viitattu 20.4.2018. <https://bit.ly/2qLjWuz>.

Klemettinen, R. 2018. Kielitoimiston sanakirjaan tulossa uusia sanoja. Kotimaisten kielten keskus. Viitattu 22.4.2018 <https://bit.ly/2HM3yUJ>

Laurila, P. 2010. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Jyväskylä: Kopijyvä Oy. E-kirja. Viitattu 29.1.2018 <http://bit.ly/2nnp9X5>.

Liikennevirasto 2017. Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot -Mittausohje. Viitattu 24.4.2018 <https://bit.ly/2HKjuXu>.

Maanmittauslaitos 2016. Maanmittauslaitoksen ortokuva. Viitattu 4.3.2018 <https://bit.ly/2uPTtRp>.

– 2018. Korkeusmallit. Viitattu 11.1.2018 <http://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/korkeusmallit>.

Mercer, C. 2018. Techworld. Best uses of drones: How 25 companies are using drones. Viitattu 22.2.2018 <http://bit.ly/2zzKUdY>.

Multi GP drone racing 2018. About MultiGP. Viitattu 13.2.2018 <https://www.multigp.com/about-multigp/>.

Mäclin, K. & Pahtaja, H. 2018. Viistokuvauksen ja kalansilmäobjektiivin soveltuvuus UAV-kuvauksiin. Lapin ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikka. Opinnäytetyö.

Nevalainen, O. 2018. Droonit mahdollistavat tehokkaan paikkatiedon keruun kuntien tarpeisiin. Positio-lehti. 6.4.2018, 12–13.

Pagliari, D., Pinto, L. & Sona, G. 2014. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. Earth Science Informatics. Vol. 7. No. 2, 97-107. Viitattu 9.1.2018 <https://doi.org/10.1007/s12145-013-0142-2>.

Positio-lehti 2018. Pienoiskopteri, drone vai robottilennokki?. 1/2018, 7.

Puziene, R., Stanionis, A., Suziedelyte Visockiene, J. & Tumeliene E. 2016. Unmanned Aerial Vehicles for Photogrammetry: Analysis of Orthophoto Images over the Territory of Lithuania. International Journal of Aerospace Engineering. pp. 1-9. Viitattu 9.3.2018.

Rantanen, J. 2014. Ilmakolmioinnin laadunvalvonta fotogrammetristen pintamallien ja laserkeilausaineiston avulla. Viitattu 6.2.2018 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/13519>.

Reinikka, J. 2018. Lennokkimääräysten tilanne 2018 alussa. Viitattu 3.4.2018 <https://bit.ly/2q3e138>.

Satpalda Geospatial Services 2018. 3D Landscape (DSM/DTM) Service. Viitattu 31.1.2018 <http://bit.ly/2DOvtOm>.

Sony 2018. RX1RM2 tekniset tiedot. Viitattu 8.2.2018 <http://bit.ly/2EaGjP4>.

Teittinen, H. 2017. Georeferoidun pistepilven tuottaminen miehittämättömällä lentoaluksella kerätystä kuva-aineistosta. Viitattu 5.1.2018 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/25161>.

Tienhaara, J. 2017. Lentojen suorittamisesta. jukka.tienhaara@maailmasta.fi. Tulostettu 11.1.2011.

– 2018. Laskennan yksityiskohdista. Puhelinkeskustelu. 26.3.2018. Viitattu 26.3.2018.

Trafi 2018a. Määräys OPS M1-32. Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lentäminen. Viitattu 12.1.2018 <http://bit.ly/2mDWEEo>.

– 2018b. Miehittämätön ilmailu. Viitattu 31.1.2018 <https://bit.ly/2ltfG9Q>.

Trimble 2018. Integrated GNSS System R10. Viitattu 7.3.2018 <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/r10>.

Trimble 2013. Tekniset tiedot – Trimble S6 takymetri. Viitattu 7.3.2018 <http://bit.ly/2D8gldq>.

Viljanen, N. 2017. Ympäristön 3D fotogrammetriset hyperspektri- ja RGB-mittaukset keveillä kauko-ohjattavilla ilma-alusjärjestelmillä. Viitattu 24.4.2018 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/24744>.

LIITTEET

- Liite 1. Laskennan 5 Agisoftin prosessiraportti
- Liite 2. Laskennan virheet

Survey Data

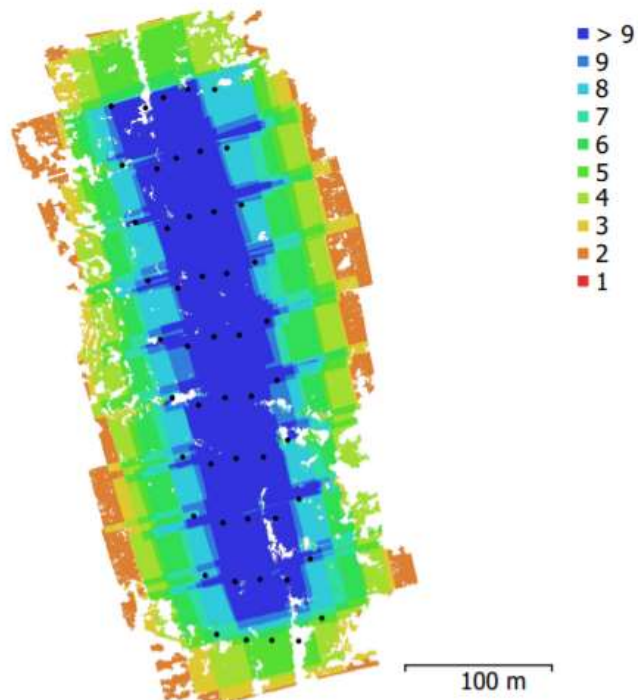


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	50	Camera stations:	50
Flying altitude:	127 m	Tie points:	43,896
Ground resolution:	1.62 cm/pix	Projections:	188,203
Coverage area:	0.0748 km ²	Reprojection error:	0.309 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
DSC-RX1RM2 (35mm)	7952 x 5304	35 mm	4.53 x 4.53 μ m	No

Table 1. Cameras.

Laskennan 5 kuvien sijainnit

Camera Calibration

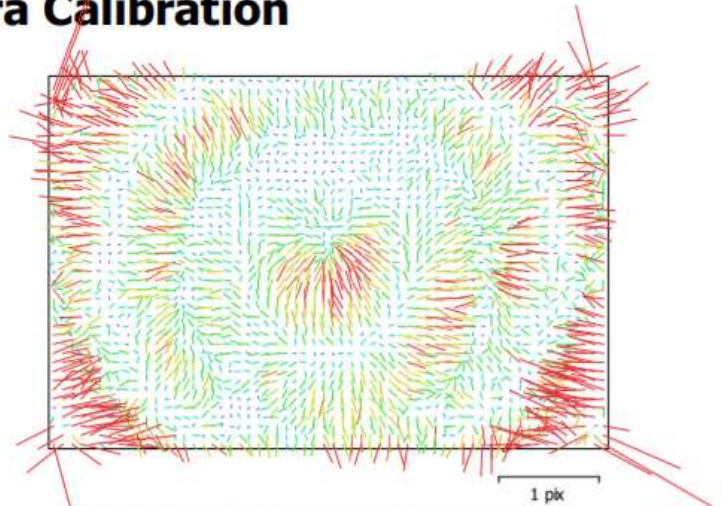


Fig. 2. Image residuals for DSC-RX1RM2 (35mm).

DSC-RX1RM2 (35mm)

50 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 7952 x 5304 35 mm 4.53 x 4.53 μ m

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	7527.1	1.7	1.00	0.44	-0.48	0.04	0.11	-0.55	0.55	-0.76	0.86	-0.37	0.45
Cx	12.6492	0.19		1.00	-0.23	-0.05	-0.00	-0.30	0.31	-0.39	0.43	-0.55	0.11
Cy	15.3936	0.25			1.00	0.02	-0.08	0.20	-0.19	0.29	-0.35	0.22	-0.60
B1	-2.18021	0.073				1.00	-0.02	-0.03	0.04	-0.06	0.07	-0.04	0.06
B2	-1.0001	0.073					1.00	-0.06	0.06	-0.08	0.09	-0.03	0.15
K1	-0.126341	0.0001						1.00	-0.98	0.91	-0.84	0.23	-0.21
K2	0.654321	0.001							1.00	-0.95	0.88	-0.23	0.20
K3	-3.10595	0.0054								1.00	-0.98	0.31	-0.30
K4	4.47658	0.0093									1.00	-0.34	0.34
P1	0.000173264	3.3e-06										1.00	-0.14
P2	-0.000127378	3.7e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Laskennan 5 kameran kalibrointiartot

Ground Control Points

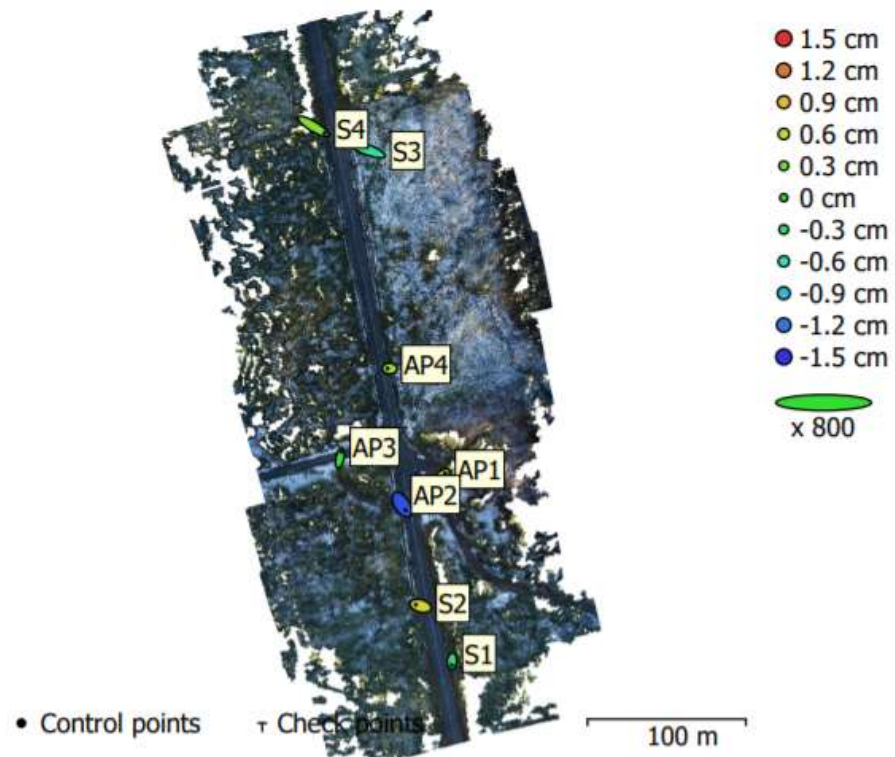


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
8	1.05154	0.717569	0.650383	1.27304	1.42956

Table 3. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Laskennan 5 GCP RMSE

Digital Elevation Model

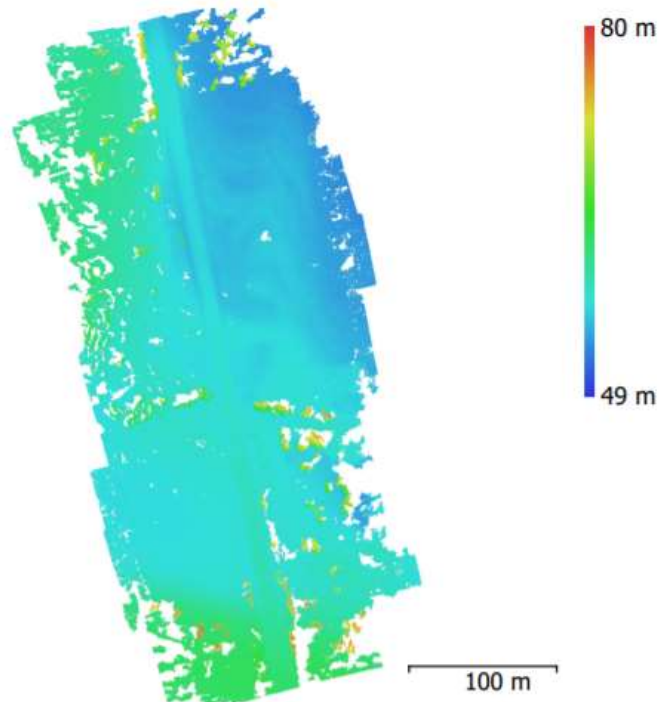


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
AP3	0.2081	0.988535	-0.0242837	1.01049	0.407 (7)
AP4	-0.316598	0.00175942	0.50796	0.598549	0.243 (9)
S3	-2.06963	0.758093	-0.453611	2.2503	0.580 (11)
S4	1.7749	-1.06247	0.351076	2.09818	0.234 (10)
S1	-0.0424932	-0.597591	-0.279822	0.661227	0.261 (9)
S2	-0.743485	0.200936	0.811891	1.11907	0.165 (10)
AP1	0.644479	0.564173	0.455682	0.970201	0.284 (11)
AP2	0.546557	-0.850123	-1.3606	1.6949	0.344 (10)
Total	1.05154	0.717569	0.650383	1.42956	0.340

Table 4. Control points.

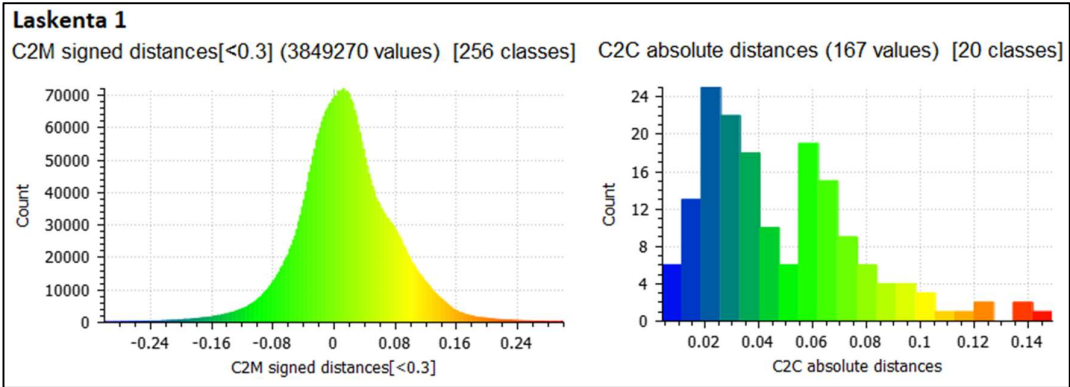
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Laskennan 5 korkeusmallin esikatselu ja GCP RMSE

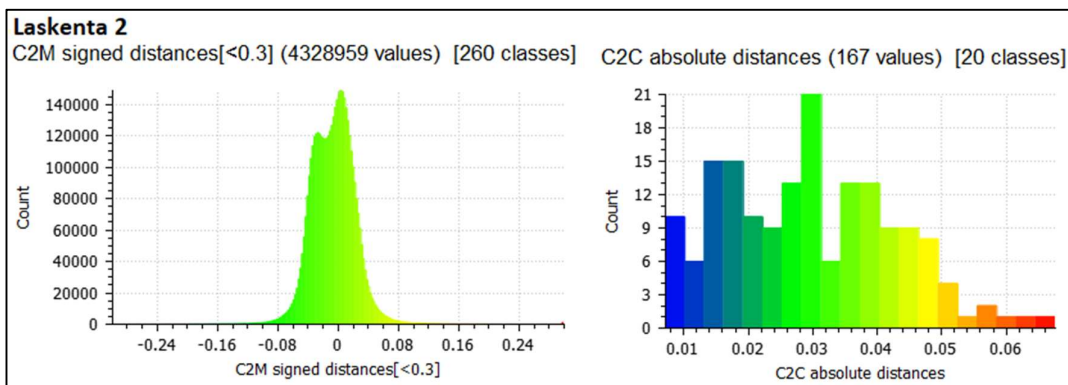
Processing Parameters

General	
Cameras	50
Aligned cameras	50
Markers	8
Coordinate system	ETRS89 / GK26FIN (EPSG::3880)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	43,896 of 48,592
Point colors	3 bands, uint8
RMS reprojection error	0.113815 (0.308799 pix)
Max reprojection error	0.759024 (6.47384 pix)
Mean key point size	2.74995 pix
Effective overlap	4.45139
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Key point limit	60,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	4 minutes 51 seconds
Alignment time	38 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	4 seconds
Depth Maps	
Count	50
Reconstruction parameters	
Quality	High
Filtering mode	Aggressive
Processing time	1 hours 5 minutes
Dense Point Cloud	
Points	78,096,404
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	1 hours 5 minutes
Dense cloud generation time	29 minutes 54 seconds
Software	
Version	1.4.1 build 5925
Platform	Windows 64

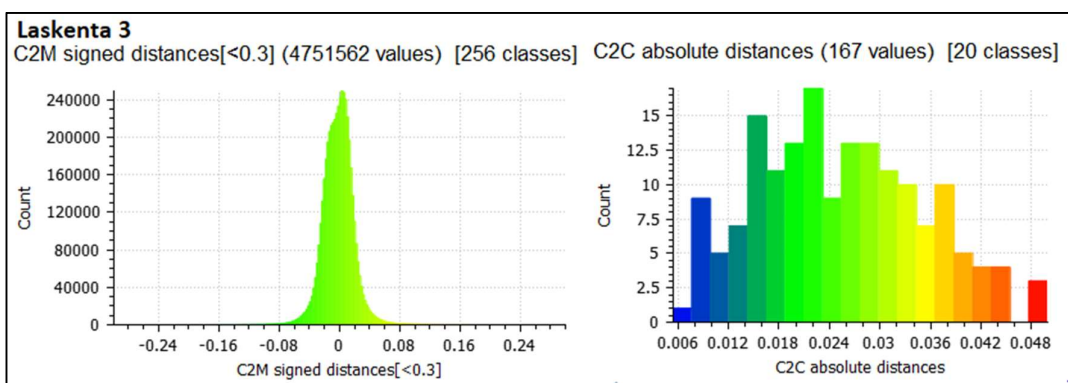
Laskennan 5 Prosessoinnin yksityiskohdat



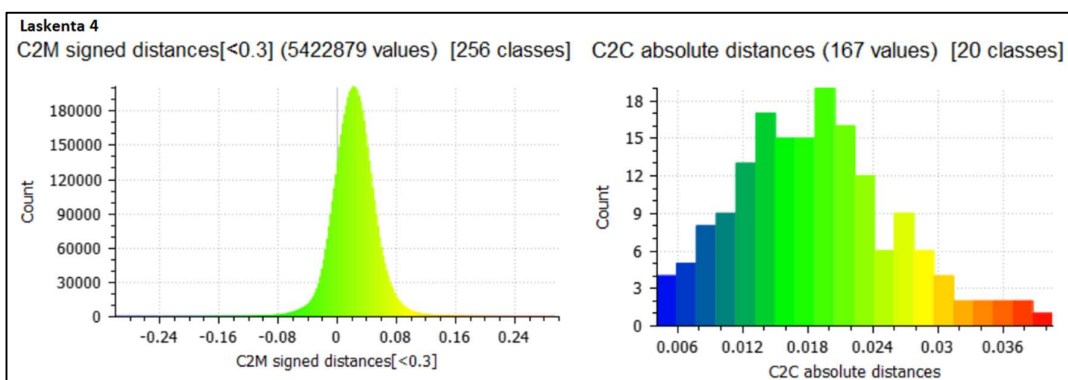
Laskennan 1 virheet



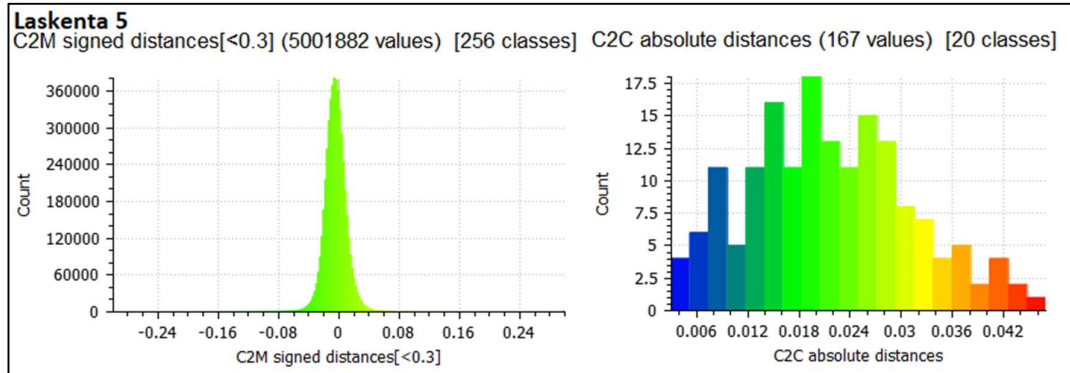
Laskennan 2 virheet



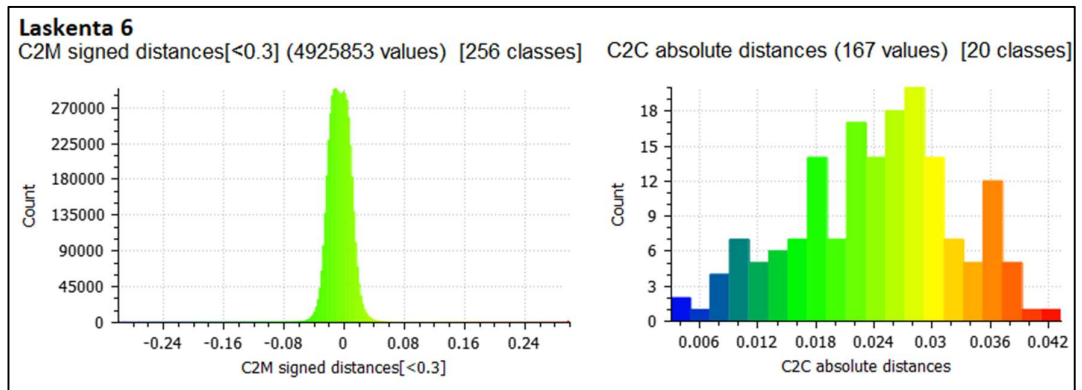
Laskennan 3 virheet



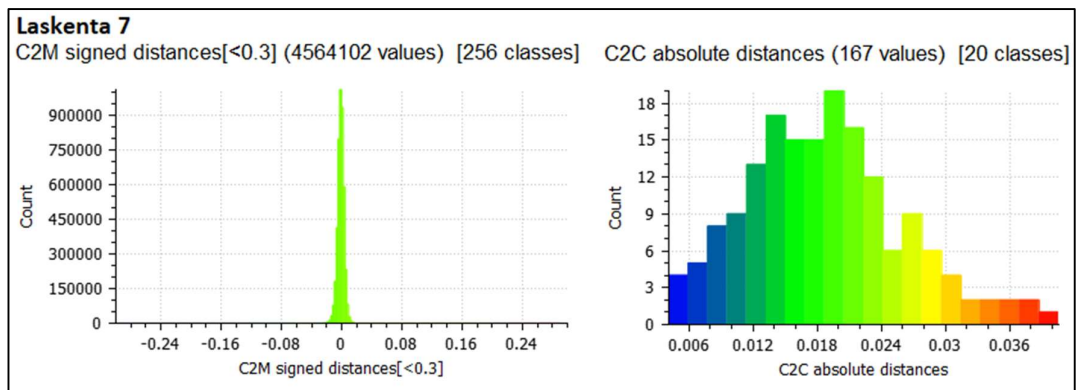
Laskennan 4 virheet



Laskennan 5 virheet



Laskennan 6 virheet



Laskennan 7 virheet